

基于数据驱动的空调水系统模型的建立

同济大学 吕岩, 潘毅群, 黄治钟

摘要

目前, 对于公共建筑的集中式空调系统来说, 其规模一般是比较大的。这就意味着, 储存在其水系统的冷冻水之中的冷量是相当可观的, 具有利用的价值。在系统优化运行控制的层面来看, 对该部分冷量的利用, 相当于对空调水系统的运行进行优化的过程中, 考察其自身的蓄能特性。在考虑到蓄能作用基础上的空调水系统优化算法, 可以实现对应于峰谷电价的错峰填谷、提前关闭系统以利用剩余冷量等更广泛的优化排期功能。

本研究以某公共建筑 BA 系统所收集得到的空调水系统运行数据为基础, 总结了部分适用于实际项目的空调水系统半物理模型的建立方法, 并采用实测数据对系统模型进行了验算, 证明了该空调水系统模型的有效性, 并为进一步的工作提出了设想。

1 综述

研究对象为空调水系统。其中, 冷水机组、末端设备中的冷盘管, 以及管道, 都具有一定的蓄能能力。关于冷冻水的蓄能, 其实质上是属于空调水系统的非稳态特性的一部分, 所以该研究必须从建立水系统设备的动态模型着手。理论上来说, 首先对这三个部分分别建立起描述其动态特性的设备模型, 再以变量传递的方式将它们连接起来, 就可以构建整个空调水系统(冷冻水环路)的动态特性模型。

在当前几乎所有的成熟的楼宇能耗模拟软件或算法中, 基本上都只采用设备的稳态模型。包括广泛采用于对瞬态系统进行模拟的平台 TRNSYS (Transient System Simulation Program), 其提供用于模拟 HVAC 相关机电系统的 TESS 库中的模型, 多数也都只能够描述设备的稳态特性, 即使是缩小模拟计算的时间步长, 模型的输出只会发生“突变”, 而无法给出其在动态响应特性下的各个变量值。不过管道的动态模型的相关研究是比较成熟的, 例如在 TRNSYS 中所提供的管道模型却是一个动态模型 (TRNSYS 自带模块 Type 709, Pipe_Duct 模型), 它考虑到了管道和内部流体的热容, 可以直接用于对管道蓄能能力的描述。

此外值得注意的是, 若研究的对象主要为冷冻水本身的蓄冷能力, 在此前提下, 由于冷水机组和末端设备中存储的冷冻水量绝对值并不大, 系统中绝大多数冷冻水都在管道之中, 所以可以只对管道的蓄冷能力进行考察, 而忽略冷机和末端处的蓄冷。事实上, 冷机和末端处的动态模型更多的也是用于描述冷机内部制冷循环的动态响应特性, 或是末端冷盘管的干湿过程的动态特性, 而这些设备的内部过程并不在 BA 系统的监测范围之内, 因此在本研究中对其采取忽略处理是可行的。

2 研究方法

一般来说, 常规的基于模型的空调水系统的运行状态优化的实现方式为: 以目前常见的集中式空调所采用的水系统为研究对象, 建立描述其设备性能的仿真模型, 并在此基础上对整个空调水系统进行模拟。基于当前和过去时刻的空调水系统负荷数据, 对未来时刻的水系统负荷进行预测, 并将预测负荷数据和预测天气参数作为系统模型的输入变量, 模

上海市嘉定区曹安公路 4800 号同济大学, 机械与能源工程学院, 201804.

Tel. 18817870632.

E-mail. m18817870632@163.com.

拟得到未来时刻空调水系统的运行参数预测值。以此为基础选择合适的目标函数和优化变量，对未来时刻空调系统的运行控制进行优化，给出未来时刻最优的控制排期表。

用于优化排期的模型一般来说都只给出系统的静态特性，没有考虑到系统中设备与管道的蓄能能力。因此，在原有模型的基础上，再引入表征空调水系统和建筑物蓄能能力的模型；在对蓄能组件的模型进行验证后，还需要确定一整套与之配套的系统优化排期的计算方法，从而最终得到完整的系统模型。

目前所获得的已有数据为外滩茂悦酒店在5月至7月两个月的时间中BA所检测到的数据，其采样间隔为5min，较短的采样间隔可以表征出模型的动态特性。其中，将所监测到的AHU的回风温度平均值，视作当前时刻的室内温度；作为训练集的数据中，各个时刻的实际负荷值由冷冻水的流量、冷冻水额定供回水温差以及水的比热相乘得到。

根据酒店BA系统的实际运行情况，选择以下变量作为建立模型所必需的监测变量，监测间隔按表2-1确定，

表 2-1 空调水系统监测变量

设备（环路）	监测变量	符号（单位）	备注
冷却水环路	冷却水质量流量	m_{cw} (kg/s)	
	冷却水进塔温度	$T_{cw,s}$ (°C)	相当于冷却水冷机出口温度 $T_{cw,o}$
	冷却水出塔温度	$T_{cw,r}$ (°C)	相当于冷却水冷机进口温度 $T_{cw,i}$
冷冻水环路	冷冻水质量流量	m_{chw} (kg/s)	
	冷冻水进口温度	$T_{chw,i}$ (°C)	
	冷冻水出口温度	$T_{chw,o}$ (°C)	
冷却塔	冷却塔风机功率	P_{fan} (kW)	功率与风量 m_a (kg/s) 之间的关系： $m_a = k\sqrt{P_{fan}}$
冷机	冷机输入功率	P (kW)	
水泵	水泵总功率	P_{pump} (kW)	
	冷却泵出口压头	H_{cw} (m)	
	冷冻泵出口压头	H_{chw} (m)	
天气参数	室外湿球温度	T_{wb} (°C)	
	室外干球温度	T_{db} (°C)	
末端设备	AHU回风温度	T_i (°C)	

3 模型建立

目前，有关空调水系统模型的相关研究已经非常成熟，已有很多用于描述各类设备的模型，并且能达到很高的精度。由于本研究所建立的空调系统模型是基于大量实测数据的基础之上的，所以在此选择采用成熟的半物理的经验模型来对各个设备进行建模。具体操作为：

3.1 冷却塔

模型输入：冷却水质量流量 m_{cw} ，冷却塔风量 m_a ，冷却水进塔温度 $T_{cw,s}$ ，室外湿球温度 T_{wb} ；

模型输出：冷却塔换热量 Q_{rej} ，冷却水出塔温度 $T_{cw,r}$ ，冷却塔风机功率 P_{fan} ；

模型方程：

$$Q_{rej} = \frac{Am_{cw}^c}{1 + B\left(\frac{m_{cw}}{m_a}\right)^c} (T_{cw,s} - T_{wb}) \quad \text{式 3-1}$$

$$P_{fan} = \frac{1}{k} \sqrt{m_a^3} \quad \text{式 3-2}$$

训练模型时，冷却水出塔温度的监测数据为已知值，因此可以结合水的比热容 c_{pw} （取 $c_{pw}=4.19\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ）、冷却水质量流量和冷却水进塔温度计算得到冷却塔换热量。反之，当模型用于优化仿真时，可以通过求得的 Q_{rej} 得到冷却水出塔温度作为模型输出：

$$Q_{rej} = c_{pw}m_{cw}(T_{cw,s} - T_{cw,r}) \quad \text{式 3-3}$$

在对冷却水出塔温度的设定值的可行性进行判断时，冷却塔需要提供换热量 Q_{rej} ，可以通过冷机的冷量 Q_e 和冷机的输入功率 P 计算得到：

$$Q_{rej}' = Q_e + P \quad \text{式 3-4}$$

由此和设定的冷却水出塔温度（作为优化变量）反推得到冷却水进塔温度，将其作为输入由模型方程得到此工况下冷却塔的最大换热量，并依此确定冷却水出塔温度的下限值，与设定的冷却水出塔温度作比较，根据其值是否合理及收敛运算是否完成进行判断。

对于只有总管数据而没有支管数据的 BA 系统而言，在训练模型前应通过计量得到的设备能耗数据判断开启冷却塔或冷机的台数，并将各计量得到的输入变量除以台数以得到单台设备的输入变量（此处默认各台对应设备是相同型号的）。

3.2 冷机

模型输入：制冷量 Q_e ，冷却水进口温度 $T_{cw,i}$ ，冷冻水出口温度 $T_{chw,o}$ ，冷冻水进口温度 $T_{chw,i}$ ；

模型输出：冷机输入功率 P ；

模型方程：

$$P = (AQ_e + B)\frac{T_{cw,i}}{T_{chw,o}} + CQ_e + D \quad \text{式 3-5}$$

训练模型时，制冷量可以由水的比热容 c_{pw} 、冷冻水质量流量 m_{chw} 、冷冻水出口温度和进口温度 $T_{chw,i}$ 得到：

$$Q_e = c_{pw}m_{chw}(T_{chw,i} - T_{chw,o}) \quad \text{式 3-6}$$

当模型用于优化仿真时，冷机的制冷量可以近似看作优化时刻的空调水系统盘管负荷预测值，直接将其作为模型的输入。

3.3 水泵

模型输入：水泵入口流体温度 T_{in} ($T_{cw,in}$ 、 $T_{chw,in}$)、水泵流量 m_w (m_{cw} 、 m_{chw})；

模型输出：水泵出口流体温度 T_{out} ($T_{cw,out}$ 、 $T_{chw,out}$)、水泵总功率 P_{pump} 、水泵总效率 η 、出口流体全压升 Δp ；

待定参数：泵送流体吸收热量的比例系数 (f_{loss})，以及用以描述水泵工作特性曲线、管路特性曲线以及水泵效率与水泵工况之间关系的各项参数。

在本模型中，由于水泵的流量在计算时是作为模型已知的输入变量，所以可以不需要对水泵的工作特性曲线进行描述，而只拟合出管路特性曲线，对应给定的流量值，在管路特性曲线上就可以确定其工作状态点。

当变流量泵变频时，其工作特性曲线发生相应的变化，并通过新的工作特性曲线和管路特性曲线，确定水泵新的工作状态点。

3.4 系统蓄冷能力

引入的管道模型：

模型输入：冷冻水质量流量 m_{chw} ，管道入口温度 T_{in} ，管道长度 L ，管道直径 d ，仿真时间步长 Δt ；

模型输出：管道出口温度 T_{out} ；

模型参数： α 、 β 、 k 、 n 。

模型方程：

$$T_{out} = \frac{1}{m_{chw}\Delta t} \sum_{j=1}^{k-1} M_j T_j + \alpha M_k T_k \quad \text{式 3-7}$$

其中， M_j 为当前时刻管道出口前第 j 个时间步长中进入管道的流体总质量， T_j 为该时刻进入管道的流体的温度。因此，参数 α 、 k 以及各时刻的 M_j 应满足下式：

$$m_{chw}\Delta t = \sum_{j=1}^{k-1} M_j + \alpha M_k \quad \text{式 3-8}$$

在对该模型的计算过程中，由于对当前时刻的出口温度的求解需要用到以前时刻的变量值，所以在每一个时间步长计算完成后，需要将该时刻的 M_j 与 T_j 值保存下来，直到后续计算中不再用到该时刻的储存值为止（该时刻进入管道的流体已全部流出管道）。每个时刻的 M_j 值按下式计算：

$$M_j = m_{chw,j}\Delta t \quad \text{式 3-9}$$

计算中，为了确定每个计算时刻 M_j 的取值，首先需要计算整个管道可以容纳的 M_j 的数量，这可以通过管道的总长和直径估算得到：

$$\rho_w \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 L = \sum_{j=1}^{n-1} M_j + \beta M_n \quad \text{式 3-10}$$

以该式为基础，可以得到在给定时刻，在各个时段进入管道的流体段 ($M_j T_j$) 在管道中的分布，那么也就可以得到需要用于计算管道出口流体温度的各个流体段的参数值，在每个时间步长计算完成后，需要对该式进行更新，以确定新的管道内的流体段状态。该计算原理的示意图如下所示：

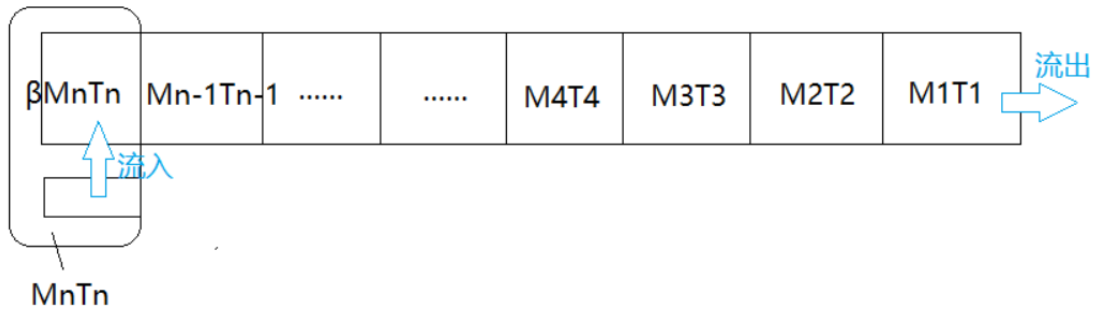


图 3-1 管道模型示意图

4 系统仿真

4.1 设备模型连接

系统模型由设备模型连接而成。设备模型的连接通过变量的传递实现。

设计规范规定，冷却塔和冷机之间应为并联连接，即各个运行的冷机的冷却水出口应并联至一根总管，总管将冷却水输送至室外，通过分水器将冷却水分送给各个运行中的冷

却塔。冷却塔的回水也应并联至总管，再由分水器分送至各环路。在冷却水环路上，冷却塔到冷机之间设有冷却水泵，按照不同楼宇空调系统设计方案的的不同，水泵与冷机可以一一对应连接，也可以并联连接。

冷机的冷冻水出口则与冷冻水泵连接，同样既可以一一对应连接，也可以采用并联的方式。冷冻水泵的出口并联至空调水系统的供水干管，将冷冻水送至末端设备。冷冻水回水干管在机房通过分水器与冷机的冷冻水入口相连接。

模型中，认为各个冷却水泵之间，以及各个冷冻水泵之间是相同的，并且在所有分水器中，冷却水、冷冻水被均匀分配给各个支路。

由此可得设备模型连接中的变量传递：

冷却水进塔温度 $T_{cw,s}$ 与冷却水冷机出口温度 $T_{cw,o}$ ：

$$T_{cw,s} = T_{cw,o} \quad \text{式 4-1}$$

冷却水出塔温度 $T_{cw,r}$ 、冷却水泵的进口温度 $T_{cw,in}$ 、出口温度 $T_{cw,out}$ 和冷机进口温度 $T_{cw,i}$ ：

$$T_{cw,r} = T_{cw,in}, T_{cw,out} = T_{cw,i} \quad \text{式 4-2}$$

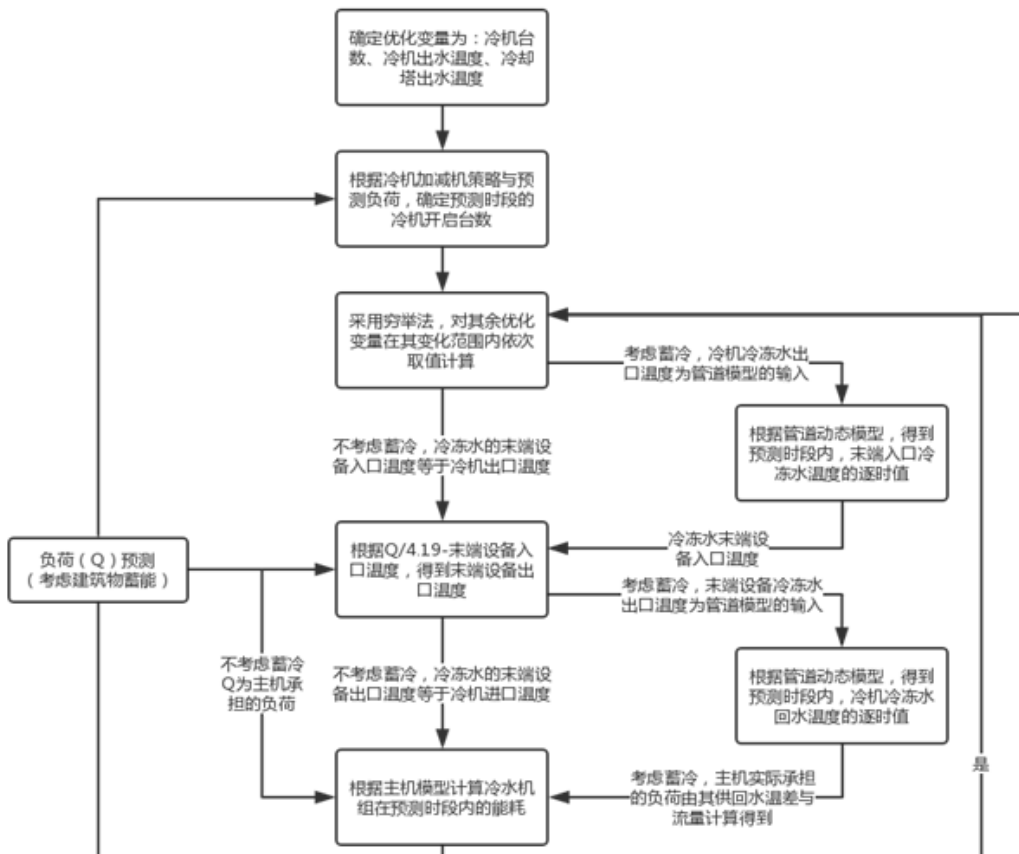
冷冻水冷机出口温度 $T_{chw,o}$ 与冷冻水泵的进口温度 $T_{chw,in}$ ：

$$T_{chw,o} = T_{chw,in} \quad \text{式 4-3}$$

4.2 系统模型建立

综上所述，目前对本研究内容中问题的解决思路初步确定为：以前文部分中所给出的空调水系统仿真优化模型（稳态）为基础，在系统模型中现有的设备模型中引入管道动态模型，按后文中所述方式对其进行修改，从而使其可以描述出系统的动态特性，将其蓄能力量化，用于后续的系统优化控制。

在考虑水系统蓄冷的情况下，仿真模型的计算方法：



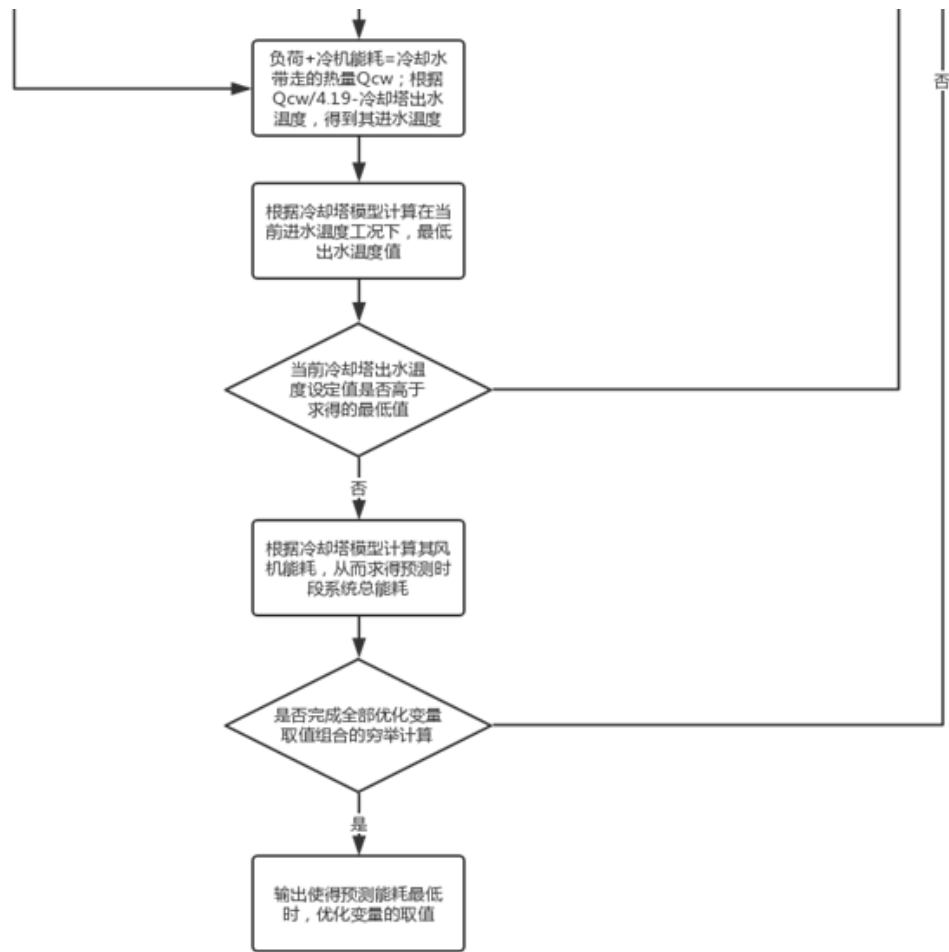


图 4-1 系统模型计算流程

5 结果与讨论

在进行实测验证前，可以通过部分仿真数据对该模型的动态特性进行验证。在 TRNSYS 平台中，将管道模型引入到了系统模型里，运行得到了仿真数据，其结果可以看出管道模型可以反映出系统的动态特性（负荷的传递有了延迟）。

表 5-1 管道模型验证

Time	OutCHWTemp	Terminal InTemp	InCHWTemp	Terminal OutTemp
4225.80	7.00	7.00	7.48	7.48
4225.90	7.00	7.00	7.48	7.48
4226.00	8.00	7.33	7.47	7.47
4226.10	8.00	7.48	7.70	7.80
4226.20	8.00	7.63	7.89	7.94
4226.30	8.00	7.83	8.04	8.08
4226.40	8.00	7.97	8.22	8.28
4226.50	8.00	8.00	8.37	8.41
4226.60	8.00	8.00	8.43	8.44
4226.70	8.00	8.00	8.44	8.43
4226.80	8.00	8.00	8.43	8.43

在以稳态运行的系统中，突然改变进入管道的冷冻水的温度，观察管道出口的温度变化速度。可以看出，管道出口处的温度变化延迟有将近 30min 的延迟效果（管段长度取 150m，管道直径取 400mm），设定温度突变为 7℃到 8℃：

将建立好的系统模型用已有的楼宇监测数据进行训练，其中 70%的数据作为训练集，30%的数据作为测试集。运行结果如下图所示：

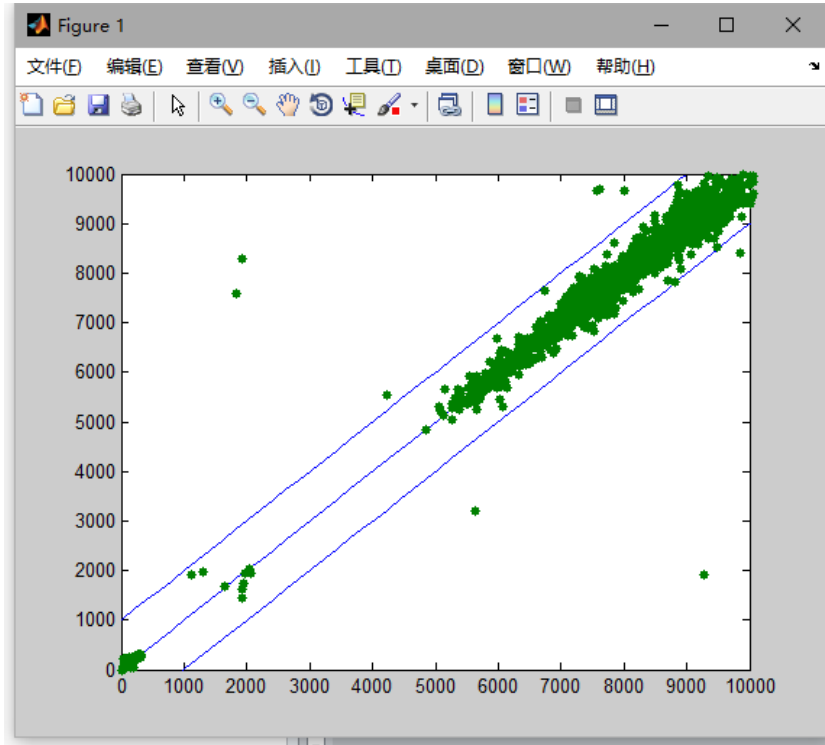


图 5-1 模型验算结果

平均误差为 1.6%，异常点很少，说明该系统模型的精度基本可以适用。也就是说，按本文所述方法所建立的空调水系统模型，在基于数据驱动的背景下，是满足要求的。

然而，目前值得注意的问题是，为了得到能够表征空调水系统停机后建筑物的动态响应特性，理论上应该选取系统发生开关机操作时的一段非稳态的时段的数据来作为训练集构建模型。但是在目前所获得的数据中，由于系统全程处于夏季制冷工况中，没有发生开关机的情况，所以暂时这种构建模型的思路还不能进行。可以等到过渡季有合适工况下的数据积累后，再进行模型的验算。

参考文献

- 【1】付朋，张吉礼，赵天怡. 中央空调冷水机组性能模型实验研究[J]. 《建筑热能通风空调》, 2016, 35 (3) :1-5.
- 【2】Lee T S, Liao K Y, Lu W C. Evaluation of the suitability of empirically-based models for predicting energy performance of centrifugal water chillers with variable chilled water flow [J]. Applied Energy, 2012, 93: 583-595.
- 【3】孟华，龙惟定，王盛卫. 中央空调水系统优化控制研究的发展及现状[J]. 《建筑热能通风空调》, 2002, 21 (6) :29-32.
- 【4】TRNSYS Manual Type709.
- 【5】徐哲恬，潘毅群，黄治钟. 基于人工神经网络的机械通风开式冷却塔运行性能在线预测[C]. 上海市制冷学会 2013 年学术年会论文集, 2013-12-18.
- 【6】赵振国, 冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.